

検証対象トンネルの状況

- ・トンネル延長 No1トンネル：L=455m、No2トンネル：L=350m
- ・前回トンネル点検 H29年度実施
- ・煤等による汚れが多い（写真1参照）
- ・ひび割れの上に直接チョーキングがなされているものが多く見られる（写真2参照）



写真1 煤等の汚れ



写真2 チョーキング状況

[A] 精度

[A-1] トンネル展開画像の作成

判読可否の判定は、トンネルに関する業務経験を有する技術者3名（「道路トンネル定期点検要領」に定められた点検員の資格を有する者）が、当該技術で取得した画像を確認し、判読の可否を合議することにより行った。以下に、検証対象および判読対象について記す。

検証対象となるひび割れについては、検証トンネル（2トンネル）の全114スパンのうち、10スパンから、ひび割れ（0.3～3mm）84カ所をできるだけ同じ幅に偏らないように比較対象ひび割れを選定した。また3mm以上や、チョーク無しひび割れについては、実際にトンネル内に対象が無いため模擬供試体をトンネル内に設置し検証を行った。

■ひび割れ

①チョーキングを判読（【レベル1】幅0.3mm以上～3.0mm未満）

検証トンネルの検証対象スパンにて、ひび割れを示すチョーキングが判読できるかどうかにより検証した。写真3に対象とした変状（チョーキング）の例を示す。

②ひび割れそのものを判読（【レベル1】幅3.0mm以上／【レベル2】幅0.3mm以上）

模擬ひび割れを設けた供試体（以下、模擬ひび割れ供試体（写真4））を用いて、ひび割れそのものが判読できるかどうかにより検証した。



写真3 実トンネルにおけるチョーキングを伴うひび割れの例



写真4 模擬ひび割れ供試体の例

評価方法

■うき・はく離

検証トンネルの検証対象スパンにて、打音異常を示すチョーキングが判読できるかどうかにより検証した。

■鋼材腐食

検証トンネルの検証対象スパンにて、鋼材腐食を示すチョーキングが判読できるかどうかにより検証した。

■漏水等

検証トンネルの検証対象スパンにて、漏水の有無・範囲が判読できるかどうかにより検証した。

以上の内容をとりまとめたもの表1に示す。

表1 [A-1] 評価対象の概要

変状種類		検証対象		判読対象	
		覆工表面 ^{※1}	模擬パネル ^{※2}	チョーキング	変状
ひび割れ	幅0.3～3.0mm	レベル1	○	○	○
		レベル2		○	○
	幅3.0mm以上	レベル1		○	○
		レベル2		○	○
うき・はく離		○		○	
鋼材腐食		○		○	
漏水等		○			○

※1 検証対象とした2トンネルの検証対象スパン

※2 15cm×15cmのモルタルパネルにひび割れを発生させたもの

各変状における判読結果の概要を以下に示す。

■ひび割れ

複数の技術で画像の白とびや画像の不鮮明により、判読できないひび割れおよびチョーキングがあった（写真5参照）。

■うき・はく離

一部技術で画像の白とびにより判読できないチョーキングがあった。

■鋼材腐食

一部技術で画像の白とびにより判読できないチョーキングがあった。

■漏水等

対象とした全ての漏水が判読可能であった。



写真5 画像の白とび

評価結果概要

[A-2] 変状写真台帳の自動整理

申請者へ変状写真台帳の提出を求めるとともに、同台帳の作成手順を示した「変状写真台帳作成手順書」を提出してもらい、この手順書に基づいて、表2の3段階で評価した。

表2 [A-2] 評価基準

評価指標	自動化の程度
○ 全自動	新技術により取得した画像から、変状箇所の写真切り出し、写真番号の番号付け、変状種類および変状部位の特定等が自動で行える。
△ 半自動	変状箇所の写真切り出し、写真番号の番号付け、変状部位等の入力をパソコン画面上的のダイアログ等に沿って手動で入力することで、写真台帳の形式で出力される。
× 手動	写真台帳の書式の各項目に該当する写真や番号を手動で入力する。

評価結果概要 本検証への申請者は3技術であり、この内2技術が半自動であり、1技術が手動であった。

[A-3] 変状の自動検出

当該技術によって自動検出した変状の結果に基づき、以下の方法により検出率・的中率を求めた。

■ひび割れ

(1) 計測対象
 検証対象トンネルにおける「①トンネル覆工面のひび割れ」および「②模擬ひび割れ供試体」（前掲写真-4）を計測対象とした。
 また、①のひび割れについては、検出対象ひび割れを指定することで明確な評価基準を設定した。

(2) 「ひび割れを正しく自動検出した延長」について
 リクワイヤメントにある「ひび割れを正しく自動検出した延長」は、以下のように定義した。
 自動検出したひび割れが近接目視により検出したひび割れ上にある。

(3) 検出率・的中率の求め方
 図1に自動検出したひび割れの評価例を示す。同図の場合、検出率・的中率は以下ようになる。

図1 自動検出したひび割れの評価例

■ひび割れ以外の変状（うき・はく離、鋼材腐食、漏水等）
 検証対象トンネルの対象スパンにて自動検出された当該変状の箇所数と、近接目視で検出した変状の箇所数から検出率・的中率を求めた。

■ひび割れ幅の検出誤差性能（参考）
 ひび割れ幅の検出誤差性能の参考値として、模擬ひび割れ供試体における各パネルの最大ひび割れ幅のRMS誤差を、下記のとおり記載した。（幅0.3mm以上3.0mm未満については0.1mm単位、幅3.0mm以上については0.5mm単位の検出）
 0.3mm以上3mm未満のひびわれの場合、全検出値の中で、RMS誤差の最大は0.93mm、最小は0.40mmであった。3mm以上のひびわれの場合、全検出値の中で、RMS誤差の最大は1.89mm、最小は0.63mmであった。
 RMS誤差とは、実測値（ a_i ）と自動検出結果（ x_i ）の差から求めた（二乗平均平方根）誤差である（下式）
 なお、Nは、正しく検出したひび割れのデータ数を表す。RMS誤差の値が小さいほど高性能である

$$RMS \text{ 誤差} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i)^2}$$

各変状に対する検出率・的中率の傾向を以下に示す。

■ひび割れ
 トンネル覆工表面では、煤等による汚れや、ひび割れの上に直接チョーキングがなされているものが多い等の要因により、ひび割れそのものの自動検出が困難であったと考えられる。このため、検出率が低い傾向にあると考えられる。
 模擬ひび割れ供試体については、ひび割れ幅が0.3mm~3.0mmのものについては、検出率に差がみられるが、幅3.0mm以上については、全社90%以上の検出率となっている。
 的中率については、ひび割れ幅にかかわらず全社90%以上となっている。

■ひび割れ以外の変状（うき・はく離、鋼材腐食、漏水等）
 使用技術によっては変状の検出数が0であったため、的中率を算出できなかった。

[B] 効率性（現場規制時間の短縮）													
検証方法	<p>現場規制時間は、個々の現場条件や点検員の作業方法によって変化するため、現場検証によって評価することは困難である。そのため、各開発者に点検記録の作成支援を行うというユースケースで当該技術を利用した際の車線規制時間短縮率の考え方をヒアリングし、近接目視による点検の規制時間と比較することで効率性の評価（現場規制時間の短縮）を行った。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>近接目視点検作業項目</th> <th>ロボット技術による点検作業項目</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">外業</td> <td>近接目視点検</td> <td>近接目視点検</td> </tr> <tr> <td>写真撮影</td> <td>ロボット技術による展開画像撮影</td> </tr> <tr> <td>変状スケッチ</td> <td></td> </tr> <tr> <td>打音点検</td> <td>打音点検</td> </tr> </tbody> </table> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>近接目視点検</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>写真撮影、変状スケッチ</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>近接目視点検</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>ロボット技術による展開画像撮影</p> </div> </div>		近接目視点検作業項目	ロボット技術による点検作業項目	外業	近接目視点検	近接目視点検	写真撮影	ロボット技術による展開画像撮影	変状スケッチ		打音点検	打音点検
		近接目視点検作業項目	ロボット技術による点検作業項目										
外業	近接目視点検	近接目視点検											
	写真撮影	ロボット技術による展開画像撮影											
	変状スケッチ												
	打音点検	打音点検											
評価結果概要	当該技術を利用することで車線規制の時間は、通常の点検作業の80～90%になると想定している。												

[C] 経済性（従来技術とのコスト比率）																						
検証方法	<p>今回検証を行った2トンネル分について、通常の近接目視点検における歩掛を各社へ提示した。そのうえで、当該技術を利用した際の内業（C-1）、外業（C-2）、内業+外業（C-3）の見積を各開発者から徴収し、近接目視点検のコストと比較を行うことで経済性の評価を行った。なお、評価結果の一覧表には、対象2トンネルの内1トンネル分（延長455m、2車線断面）の費用を示している。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>近接目視点検作業項目</th> <th>ロボット技術による点検作業項目</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">外業</td> <td>近接目視点検</td> <td>近接目視点検</td> </tr> <tr> <td>写真撮影</td> <td>ロボット技術による展開画像撮影</td> </tr> <tr> <td>変状スケッチ</td> <td></td> </tr> <tr> <td>打音点検</td> <td>打音点検</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">内業</td> <td>点検調書作成(写真台帳整理、展開図作成以外)</td> <td>点検調書作成(写真台帳整理、展開図作成以外)</td> </tr> <tr> <td>写真台帳整理</td> <td>ロボット技術による自動写真台帳整理^{※1}</td> </tr> <tr> <td>展開図作成</td> <td>ロボット技術による展開図作成^{※2}</td> </tr> <tr> <td>打音点検調書</td> <td>打音点検調書</td> </tr> </tbody> </table> <p>※1 変状写真台帳の自動整理(A-2)を備えていない技術の場合、従来技術による写真台帳整理費用を計上している。 ※2 変状の自動検出(A-3)を備えていない技術の場合、従来技術による展開図作成費用を計上している。</p>		近接目視点検作業項目	ロボット技術による点検作業項目	外業	近接目視点検	近接目視点検	写真撮影	ロボット技術による展開画像撮影	変状スケッチ		打音点検	打音点検	内業	点検調書作成(写真台帳整理、展開図作成以外)	点検調書作成(写真台帳整理、展開図作成以外)	写真台帳整理	ロボット技術による自動写真台帳整理 ^{※1}	展開図作成	ロボット技術による展開図作成 ^{※2}	打音点検調書	打音点検調書
		近接目視点検作業項目	ロボット技術による点検作業項目																			
外業	近接目視点検	近接目視点検																				
	写真撮影	ロボット技術による展開画像撮影																				
	変状スケッチ																					
	打音点検	打音点検																				
内業	点検調書作成(写真台帳整理、展開図作成以外)	点検調書作成(写真台帳整理、展開図作成以外)																				
	写真台帳整理	ロボット技術による自動写真台帳整理 ^{※1}																				
	展開図作成	ロボット技術による展開図作成 ^{※2}																				
	打音点検調書	打音点検調書																				
評価結果概要	外業と内業の計は、従来技術に対して約90%～110%程度となっている。																					

講評
<p><input type="checkbox"/> 必須性能</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ トンネル展開画像作成（A-1） <ul style="list-style-type: none"> ロボット技術によるトンネル展開画像作成（A-1）で取得した画像は、ひび割れについては80%以上、うき・はく離、漏水は92%以上の高い確率で判読可能であり、現地の変状のスケッチや、写真撮影の労力、点検調書作成の内業の労力を低減できる。鉄筋腐食において白とびにより判読できない技術があったため、今後の精度向上による改善が望まれる。 <p><input type="checkbox"/> 追加性能</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 変状写真台帳の自動整理（A-2） <ul style="list-style-type: none"> 撮影されたトンネル展開画像から半自動で写真台帳の整理が行われるため、台帳作成の労力が低減される。今後自動化の開発が望まれる。 ○ 変状の自動検出（A-3） <ul style="list-style-type: none"> 変状の自動検出（A-3）は、ひび割れの幅、長さ等を定量的に把握することが可能となり、さらに二回目以降の点検結果と比較することで、進行の把握も可能となる技術である。 <p><input type="checkbox"/> 経済性（C）</p> <p>今回の現場実証試験においては、ロボット技術によるコスト評価にも近接目視点検費用が含まれている。今後、本技術が、近接目視点検と同等の健全性の診断を行うことができる精度に向上し、近接目視点検を代替する技術となった場合は、大幅な労力とコストの削減につながるものと考えられる。</p>